

# 태양전지 제작을 위한 Hollow Cathode Plasma System의 실리콘 건식식각에 관한 연구

論 文

53C-2-2

## A study on Silicon dry Etching for Solar Cell Fabrication Using Hollow Cathode Plasma System

柳 鎮 洙\* · Suresh Kumar Dhungel\* · 李 準 信\*\*  
(Jin-Su Yoo · Suresh Kumar Dhungel · Junsin Yi)

**Abstract** - This paper investigated the characteristics of a newly developed high density hollow cathode plasma (HCP) system and its application for the etching of silicon wafers. We used SF<sub>6</sub> and O<sub>2</sub> gases in the HCP dry etch process. Silicon etch rate of 0.5 $\mu$ m/min. was achieved with SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub> plasma conditions having a total gas pressure of 50mTorr, and RF power of 100 W. This paper presents surface etching characteristics on a crystalline silicon wafer and large area cast type multicrystalline silicon wafer. The results of this experiment can be used for various display systems such as thin film growth and etching for TFT-LCDs, emitter tip formations for FEDs, and bright plasma discharge for PDP applications.

**Key Words** : Hollow Cathode Plasma(HCP), Multicrystalline, Ion bombardment, Texturing

### 1. 서 론

기술의 진보와 함께 고집적화, 패턴(Pattern)의 미세화, 소자의 고성능화, 웨이퍼의 대구경 등의 요구조건으로 말미암아 반도체제조에 있어 플라즈마(plasma) 공정은 불가피한 기술로 되어왔다. 플라즈마(plasma) 공간에서 일어나는 기체의 화학반응, 웨이퍼의 표면에서의 다양한 화학반응, 이것에 방전으로 생긴 직류전압으로 가속된 이온의 충격 효과가 더하여 다양한 공정이 실현되었다. 그 중에서도 건식식각(dry etching) 기술은 종래의 용액을 사용하는 습식식각(wet etching) 기술과 비교하면 초미세 패턴의 식각에서 압도적으로 유리하다.[1, 2]

1960년대 말까지 소위 'wet etching'이라 불리는 화학적 에칭은 집적회로 공정의 핵심기술이었다. 실로 공정의 필수요소로 습식식각은 저가로 공정이 가능하게 하였고 무한한 선택비를 제공하였다. 그러나 이는 미세 패턴과 초미세 패턴의 공정기술에 제한성이 있었다. 따라서 미세 전자회로의 고밀도 패턴(pattern)을 형성하기 위해서 비등방성 식각은 필수조건이 되었다. 1970년대 초까지 CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> 건식식각은 마스크 형성(patterning)에 널리 적용되었고 비등방성 식각이 가능하게 하였다. 결과적으로 건식식각 기술은 비등방성 etch profile을 보편화시키고 점진적으로 발전하게 되었다. 건식식각 기술이 IC집적회로에 처음으로 등장하였으나 습식식각처럼 이용이 되었고 resolution이 언더컷(undercutting)에 의해서 제한되었다. 이에 더 많은 에칭 기술이 보급되었고 RIE

(reactive ion etching)기술이 IC 집적회로에 널리 적용되었다.[3-6]

플라즈마(plasma) 식각이 요구되는 이유는 플라즈마(plasma)는 가스 상태이고 효율성이 뛰어나므로 습식식각에 비하여 공정 중 발생하는 폐기물량이 매우 적어 환경오염을 상당히 억제할 수 있는 장점과 웨이퍼를 진공속에 두어 외부로부터의 오염이 차단되는 장점을 가지고 있기 때문이다. 이런 플라즈마(plasma)를 이용하여 실리콘 웨이퍼의 표면을 건식식각에 적용하고 플라즈마(plasma) 식각 공정 변수인 입력 파워와 주파수, 반응가스의 선택과 혼합비, 가스압력, 전극의 구성과 배치, 전기장과 기판의 바이어스 전압 등을 가변한다. 플라즈마(plasma) 식각에서 손상과 오염은 낮은 수율과 디바이스 신뢰성의 열화를 야기하므로 해결해야할 심각한 문제들이다. 일반적으로 손상은 웨이퍼 표면에서 고 에너지를 갖는 이온 충격에 의한 격자 손상과 전기적 손상등이 있다. 이러한 손상을 감소시키고, 식각의 요구되는 조건들(낮은 공정압력, 고 이온화율, 높은 식각속도, 좋은 식각 균일도)을 가장 적절히 충족시키는 것이 고밀도 플라즈마(plasma) 발생장치이다. 현재의 가장 큰 문제점은 플라즈마(plasma) 밀도의 공간적 균일성 확보에 있다.[7]

Hollow cathode 플라즈마 발생장치는 음극으로 속이 빈 원통형을 사용하는 것으로 원통형 음극 내부에 축 방향을 따라 균일하고 밀도가 높은 플라즈마를 발생시킬 수 있는 장점을 가지고 있어 고밀도 플라즈마의 공간적 균일성을 확보할 수 있다. 따라서, hollow cathode 플라즈마 발생장치는 낮은 방전전압에서 플라즈마(plasma)를 유지할 수 있으므로 저전압, 저전력으로 고밀도의 플라즈마를 발생시킬 수 있다. [8-10] 본 연구에서는 Hollow cathode plasma system을 이용하여 입력 power, 식각비, 실리콘 표면 특성을 고찰하고 이에 적용할 수 있는 분야에 중점을 두었다.

\* 準 會 員 : 成均館大學 情報通信工學部 博士課程

\*\* 正 會 員 : 成均館大學 情報通信工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 2003年 8月 26日

最終完了 : 2003年 11月 25日

### 2. 실험방법

본 시스템은 그림 1에서와 같이 석영(Quartz) 유리관에 sus나 Cu 물질의 cathode를 만들고 그 안에 전극을 형성하여 Matching network에 접지를 시킨다. Hollow cathode는 Matching Network (MMN-100N)에 케이블로 연결하고 RF plasma generator (NPR, New power co., radio frequency 13.56MHz 고정)는 Matching Network에 연결시켜 플라즈마(plasma)를 유기시킨다. Quartz 유리관 한쪽에 SF<sub>6</sub>와 O<sub>2</sub>가 주입될 수 있도록 관을 연결하고 반대쪽에는 저진공 펌프를 연결하여 진공 상태를 유지할 수 있게 한다. 표 1은 Hollow cathode plasma system에 적용된 식각 조건을 나타낸 것이다.

본 실험에서 획득한 시료의 식각비를 구하기 위해서 Alpha-step (Tencor, Alpha-step 500)을 이용하여 측정하였으며 동일조건 시편의 평균 식각비를 구하였다. 또한 식각 실험 후 표면 텍스처(texture)된 상태를 관찰하기 위하여 SEM (Hitachi S-2150) 분석을 하였다. 뿐만 아니라 AFM(Digital Instrument Nanoscope 3A) 분석을 병행하여 계면상태를 관찰하였다.

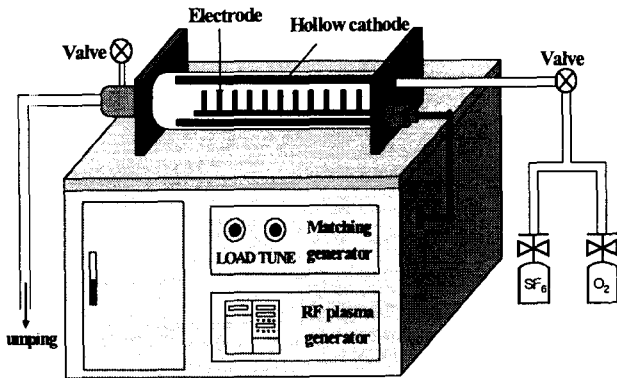


그림 1 Hollow cathode 플라즈마 시스템의 개략도.  
Fig. 1 Schematic drawing of the hollow cathode plasma system

표 1 Hollow cathode 플라즈마 시스템의 공정 조건.  
Table 1 Process condition of the hollow cathode plasma system

Etching 조건	압력 (mTorr)	가스 분압비 (SF <sub>6</sub> : O <sub>2</sub> ratio)	Power (W)
가변 범위	20~150	100:0~60:40	20~200

### 3. 실험결과 및 고찰

SF<sub>6</sub>와 O<sub>2</sub> 가스 비율을 100:0에서 60:40까지 변환하였고, 전체 압력은 50mTorr로 고정하였다. Power는 100W, 식각 시간은 20분 동안 진행하였다. 그림 2는 Polishing 된 단결정

웨이퍼를 이용한 SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub>의 양에 따른 식각률로서, SF<sub>6</sub>가스의 양이 증가할수록 Si 식각이 더 증가함을 알 수 있다. 그러나 SF<sub>6</sub>와 O<sub>2</sub> 비율이 90:10 일 때가 SF<sub>6</sub> 가스만을 사용했을 때 보다 높다는 것을 알 수 있다. SF<sub>6</sub>에 O<sub>2</sub>를 소량으로 첨가시키는 것은 F 원자 밀도를 순간적으로 증가시키기 때문에 식각비가 SF<sub>6</sub>만을 사용했을 때보다 높은 것이다. SF<sub>6</sub> 플라즈마에 O<sub>2</sub>를 첨가한 효과는 CF<sub>4</sub> 플라즈마에 O<sub>2</sub>를 첨가한 것과 동일하다.[11] 혼합된 SF<sub>6</sub>와 O<sub>2</sub>는 SF<sub>5</sub>, F, O 라디칼로 분해시키고 더 높은 F 원자밀도는 SO<sub>2</sub>, SOF<sub>4</sub>의 형성하는 SF<sub>x</sub>에 O<sub>2</sub>의 반응과 SOF<sub>4</sub>를 형성하는 O에 SOF<sub>4</sub>와 SF<sub>6</sub>의 반응 때문이다.

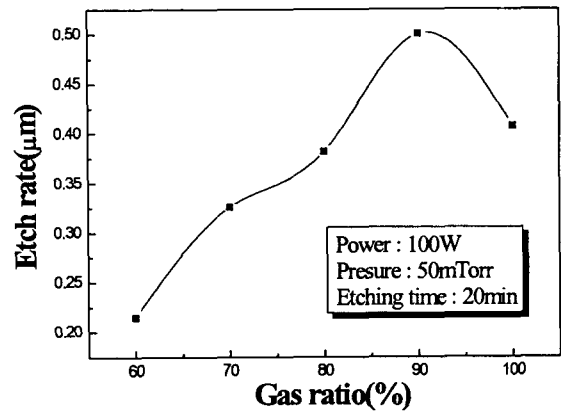


그림 2 SF<sub>6</sub>와 O<sub>2</sub> 비율에 따른 식각율  
Fig. 2 Etch rate as a function of the gas ratio(SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub>)

그림 3은 SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub> 비율에 따른 다결정 실리콘의 SEM 사진을 나타내었다. (a)는 전혀 식각하지 않은 단면 사진을 나타내고 (b)는 SF<sub>6</sub>(50mTorr)만 사용하고 (c)는 SF<sub>6</sub>:O<sub>2</sub>의 비율이 9:1(SF<sub>6</sub>=45mTorr, O<sub>2</sub>=5mTorr) (d)는 7:3(35mTorr,15mTorr) power는 100W, 전체 압력은 50mTorr, 식각시간은 20분으로 진행하였다. F 라디칼은 에칭을 주도하고 O 라디칼은 Si 보호하는 역할을 수행한다. 식각과 Passivation의 밸런스는 결과적으로 수직적인 식각을 유도하게 된다. 따라서 시간이 오래 지속될수록 (C)와 같이 식각비가 커지고 한계점에 도달하게 된다. 또한 에칭이 진행됨에 첨단(spike)이 나타나는데 이것은 실리콘과 얇은 박막을 보호하는 S<sub>x</sub>O<sub>y</sub>F<sub>z</sub>사이에서 구성된다. 식각된 표면은 빛을 흡수하는 파장으로 여기하는 역할을 하고 이 빛은 표면을 식각하는 곳으로 수집되어 육안으로 검은색으로 보이게 된다. 반면에, (d)의 경우, 충분한 O<sub>2</sub>가 플라즈마에 존재하므로 O<sub>2</sub> 또는 O는 공정이 진행된 웨이퍼의 film adsorption을 점유하고 그러므로 식각을 억제하게 되어 식각률이 감소한 상태의 완만한 표면을 유지하는 것으로 사료된다.[12]

그림 4는 Power 100W, SF<sub>6</sub>:O<sub>2</sub> 가스비 45:5, 압력 50 mTorr에서 시간에 따라 etch depth를 조사하였다. 시간에 비례하여 Si 식각이 계속 진행됨을 알 수 있고 20분에서 1시간 까지 식각을 진행한 결과 6.4µm에서 8.6µm까지 식각이 되었음을 알 수 있었다.

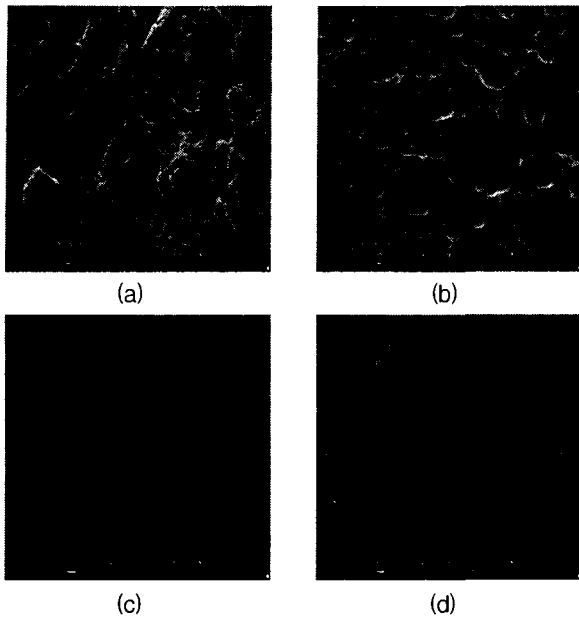


그림 3 SF<sub>6</sub>와 O<sub>2</sub> 비율에 따른 다결정 실리콘의 SEM 사진  
 Fig. 3 SEM photograph of poly-Si as a function of the gas ratio(SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub>)

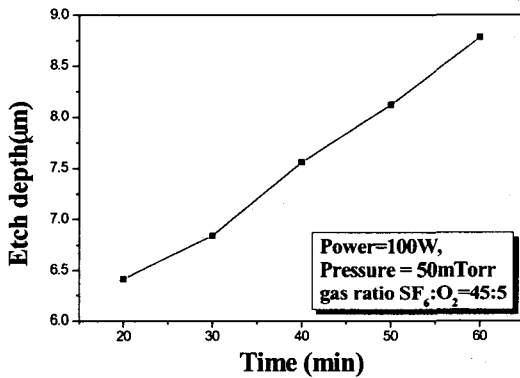


그림 4. 시간에 따른 etch depth  
 Fig. 4. Etch depth as a function of the time

그림 5는 건식식각에 따른 AFM사진을 나타내었다. (a)는 식각하지 않은 poly-Si 단면의 사진을 나타내었다. grain-boundary의 형상에 따라 굴곡이 완만하게 나타난다. (b)와 (c)의 조건은 전체 압력 50mTorr, power 100W, SF<sub>6</sub>와 O<sub>2</sub>의 비율 4:1(SF<sub>6</sub>=40mTorr, O<sub>2</sub>=10mTorr)이고 식각시간은 10분이었다. (b)는 PR용액으로 보호되어 에칭이 안 된 부분으로 표면이 완만하게 나타났다. (c)는 식각된 단면을 보여주며 텍스처링(texturing)이 많이 되었음을 보여준다. 대면적 기판에 마스크 없이 불규칙하게 텍스처링(texturing)한 결과인데 결정 방향에 독립적으로 배열이 가능하게 에칭이 가능하다. 미세 구조에서의 빛의 흡수율은  $\lambda/2n$  ( $\lambda$ : 빛의 파장길이, n: Si 굴절계수)을 기초로한 waveguide mechanism으로 설명이 가능하다. 따라서 태양전지에서는 산모양의 텍스처링(texturing)을 하면 빛을 많이 흡수하여 효율향상에 기여할 수 있다. 또한 FED에서는 emitter tip을 형성할 수 있다.

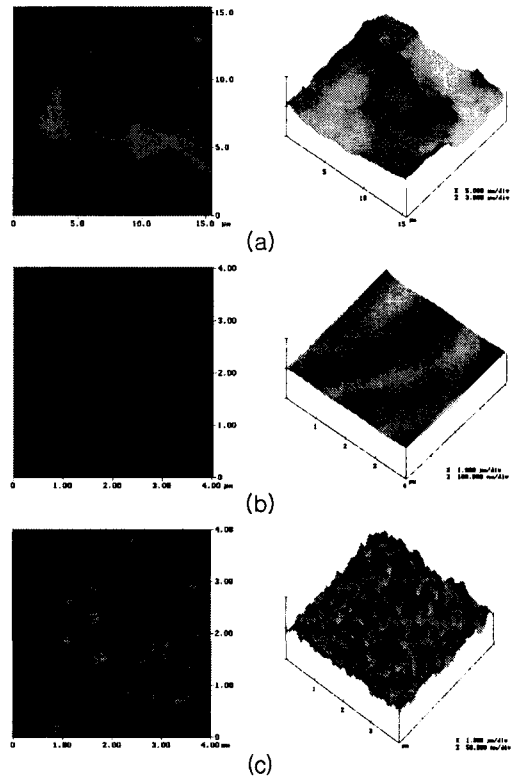


그림 5. 건식식각에 따른 다결정 실리콘의 AFM 사진  
 Fig. 5. AFM photograph of poly-Si as a function of the dry etching

그림 6은 스크린 프린터(screen printer)로 Al 후면전극을 형성한 단결정 및 다결정 태양전지에 power 100W, SF<sub>6</sub>:O<sub>2</sub> 가스비를 45:5, 압력 50mTorr에서 20분간 식각한 후 SEM사진을 보여준다. compuscope(성진미디어)로 각도와 aspect ratio를 측정한 결과 단결정은 90.34°~98.72°의 균일한 분포를 보였으며 aspect ratio가 약 0.5427을 나타내었고 다결정은 78.93°~108.83°의 넓은 각도의 분포를 보이며 aspect ratio가 0.3468를 나타내었다. 따라서 첨단이 단결정보다 작다는 것을 알 수 있으며 이는 빛을 흡수하는데 단결정보다 적게 작용하리라 판단된다.

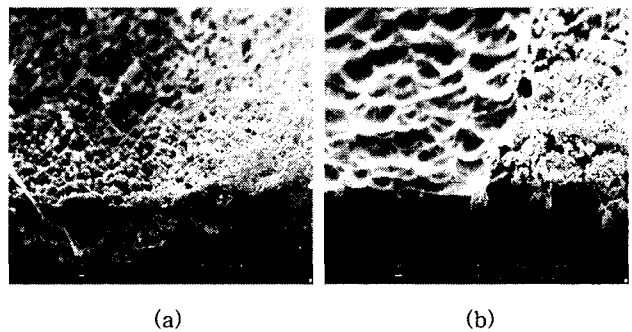
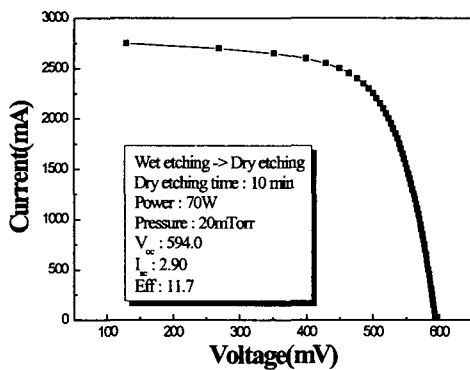
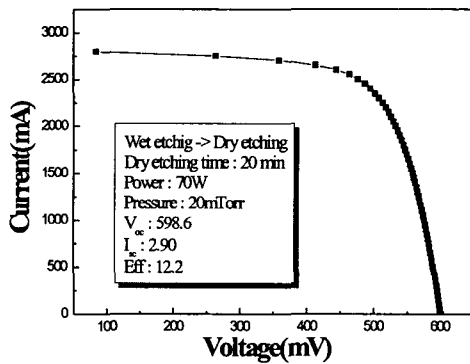


그림 6 후면전극 형성 후 식각된 단결정 및 다결정 태양전지의 SEM 사진.  
 Fig. 6 SEM photograph of the etched c-si solar cell and poly-si solar cell after the formation of back-side metal contact

현재 태양전지제조 기술은 대량 생산에 맞춰 wet station 을 이용한 습식식각으로 공정이 진행되어 건식식각 기술이 거의 이루어지지 않는다. 그러나 본 논문에서는 대량생산을 할 수 있도록 Hollow cathode plasma system을 이용하였기 때문에 가능하리라 판단된다. 그림 7은 HF 와 HNO<sub>3</sub>를 6:1로 섞어 10분간 습식식각을 한 후 70W, pressure 20mTorr, SF<sub>6</sub> O<sub>2</sub> 비율 9:1로 10분간 건식식각을 한 후 태양전지를 제조한 후 I-V 곡선을 나타낸 그래프이다. (a)와 (b)를 비교하면 I<sub>sc</sub>가 2.90mA로 일정하나 V<sub>oc</sub>가 4.6mV의 차이로 인해 0.5% 효율의 차이가 생겼다. 이는 식각시간을 길게 하면서 첨단이 더 길게 생겨 aspect ratio가 커지고 이로 인해 빛을 더 많이 흡수하여 효율을 향상시켰으리라 사료된다.



(a)



(b)

그림 7 건식식각 후 태양전지의 I-V 곡선.  
Fig. 7 I-V curve of solar cell after dry etching

#### 4. 결 론

본 논문에서는 Hollow cathode plasma system을 이용하여 Si를 식각하고 특성 고찰 및 태양전지 제작함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. SF<sub>6</sub>와 O<sub>2</sub>로 식각한 결과 F 라디칼은 식각을 주도하고 O 라디칼은 Si 보호하는 역할을 수행한다. 식각과 패시베이션(passivation)의 밸런스는 결과적으로 수직적인 에칭을 유도하게 된다. 또한 식각이 진행됨에 첨단(spike)이 나타나는데 이것은 실리콘과 얇은 박막을 보호하는 S<sub>x</sub>O<sub>y</sub>F<sub>z</sub>사이에서 구성된다. SF<sub>6</sub>와 O<sub>2</sub> 비율이 90:10 일 때 식각비가 0.5μm/min로 제일 높았고 압력이 증가함에 따라 SF<sub>6</sub>와 O<sub>2</sub>가스의 더 많은 이온과 원자들이 격렬히 반응하고

이에 따라 식각비가 증가하였다. 또한 power가 높아짐에 따라 전자와 이온의 운동이 급격히 증가하게 되어 식각률이 높았다. 100W, 50mTorr, SF<sub>6</sub>와 O<sub>2</sub> 비율이 90 : 10의 조건에 20분에서 1시간까지 식각을 진행한 결과 6.4μm에서 8.6μm까지 식각이 되었다. 단결정과 다결정 aspect ratio를 측정한 결과 단결정은 90.34°~98.72°의 균일한 분포와 aspect ratio가 약 0.5427을 나타내었고 다결정은 78.93°~108.83°의 넓은 각도의 분포와 aspect ratio가 0.3468를 나타내었다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축 지원 사업의 지원에 의해서 수행된 연구결과입니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] M. Sugawara, "Plasma etching fundamentals and applications", Oxford University Press Inc., New York, pp. 1-2, 1998
- [2] E. F. Zalewski, R. A. Keller, and R. Engleman, "Laser induced impedance change in a neon hollow cathode discharge. A mechanistic study", Jr, J. Chem. Phys. 70, 1015(1979)
- [3] G. J. Beenen, B. P. Lessard, and E. H. Plepmeir, "Laser-induced impedance change in pulsed hollow cathode lamps", Anal. Chem 11, 1721(1979)
- [4] K. C. Smyth, B. L. Bentz, C. G. Bruhn, and W. W. Harrison, "The role of Penning ionization of the minor species in a neon hollow cathode discharge", J. Am. Chem. Soc. 101, 797(1979)
- [5] K. C. Smyth and R. A. Keller and F. F. Crim, "Photon-induced ionization change in a neon discharge", Chem. Phys. Lett. 55, 473(1978)
- [6] B. Chapman, Glow Discharge Process; Wili: New York, 1980
- [7] M. Elwenspoek, H. V. Jansen "Silicon micromachining", Cambridge university press, pp. 304-305, 1998.
- [8] Ralf Lüdemann, Sebastian Schaefer, Corina Schüle, Christopher Hebling, "Dry Processing of mc-Silicon Thin-Film Solar Cells on Foreign Substrates leading to 11% Efficiency", 26<sup>th</sup> PVSC, pp. 159-162, 1997.
- [9] M. Elwenspoek and H. V. Jansen, "silicon micromachining", university of cambridge, pp. 285, 1998
- [10] R. J. Buss, D. S. Ruby, G. A. Hebler and P. Yang "Modeling a Dry Etch Process for Large-Area Devices" Workshop on Crystalline-Silicon Solar Cell Materials and Process, Breckenridge, CO, 9-11 August 1999
- [11] Oehrlein, G. S., J. F. Rembetzki, and E. H. Payne, J. Vac. Sci. Tech-nol., B8: 1199 (1990)
- [12] Mogab, C. J., A. C. Adams, and D. L. Flamm, J. Appl. Phys., 49: 3796 (1978)

## 저 자 소 개



### 유진수(柳鎭洙)

1971년 5월 15일 생. 2000년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2002년 동 대학원 정보통신공학부 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정

Tel : 031-299-6570, Fax : 031-290-7159

E-mail : jsyoo@joy.skku.ac.kr



### Suresh Kumar Dhungel

1966년 2월 2일 생. 1990년 Tribhuvan University(네팔) 물리학과 졸업. 1993년 동대학원 물리학과 졸업(석사). 현재 성균관대학교 정보통신공학부 박사과정

Tel : 031-299-6570, Fax : 031-290-7159

E-mail : suresh@joy.skku.ac.kr



### 이준신(李準信)

1962년 12월 7일 생. 1989년 성균관대 전기공학과 졸업. 1991년 State University of New York 졸업(석사). 1994년 동대학원 졸업(공학박사). 2000년~현재 성균관대학교 정보통신공학부 부교수

Tel : 031-290-7139, Fax : 031-290-7179

E-mail : yi@yurim.skku.ac.kr